

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ АДАПТИВНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ И ПОМЕХ ОДНОВРЕМЕННОГО ДЕЙСТВИЯ В ЛИНИЯХ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА

к.т.н. Б.Б. Поспелов, М.В. Грушенко
(представил д.т.н., проф. В.И. Долгов)

Рассматривается модифицированный алгоритм адаптивной обработки сигналов и помех одновременного действия. Исследуются основные показатели эффективности адаптивной обработки сигналов и помех при использовании данного алгоритма с нестационарным и периодическим оператором сглаживания.

Постановка проблемы. Средства информационного обмена (ИО) являются важным элементом различных специальных систем управления подвижными объектами в воздушном и космическом пространстве. В последнее время существенно возросли требования по достоверности, объему и скорости передачи информации в линиях ИО. Для военных систем управления авиацией указанные требования должны выполняться в условиях массового радиоэлектронного противоборства со стороны противника. Однако находящиеся на вооружении ВВС средства ИО практически не способны удовлетворять указанным требованиям. Поэтому проблема защиты средств ИО от преднамеренных помех противника для систем управления авиацией стоит остро.

Решение данной проблемы тесно связано с важными научными и практическими задачами, предусматриваемыми программами модернизации самолетов ВВС. Важное место в решении этой проблемы отводится адаптивной обработке сигналов и помех в антенных системах авиационных средств информационного обмена. Такая обработка позволяет обеспечивать высокую достоверность передачи информации без снижения пропускной способности линий информационного обмена.

Анализ литературы. Общая теория адаптивной обработки сигналов и помех в антенных системах различных радиосистем к настоящему времени уже сформировалась [1 – 6]. Однако при реализации ее в авиационных линиях ИО возникает ряд новых научных и практических задач, требующих своего решения. Как показывают исследования, известные методы и алгоритмы адаптивной обработки сигналов и помех в антенных си-

стемах в условиях борта оказываются в большинстве случаев недостаточно эффективными [7]. Объясняется это сложностью реальной сигнально-помеховой обстановки на борту по сравнению с теми, при которых были получены известные алгоритмы. Поэтому необходимо проведение дальнейших исследований, направленных на повышение эффективности известных методов и алгоритмов адаптивной обработки сигналов и помех в антенных системах авиационных линий ИО.

Складывающаяся в условиях борта сигнально-помеховая обстановка с математической точки зрения такова, что функции качества адаптивных систем обработки оказываются случайными, их градиенты вычисляются с ошибками, а линии уровня функций качества имеют изломы. В этих условиях для повышения эффективности адаптивной обработки полезным может оказаться введение в алгоритмы адаптации операции усреднения (сглаживания, фильтрации). Целесообразность применения операции усреднения в алгоритмах адаптации обусловлена тем, что необходимо уменьшить влияние помех на процесс адаптации, сделать его более регулярным. Исследованию математических аспектов применения операции усреднения в методах стохастического программирования посвящена работа [8]. В ней отмечается, что операции усреднения случайных функций, градиентов или аналогов градиентов для негладких функций оказываются очень полезными при решении разнообразных задач стохастического программирования. Однако в окрестности решения методы с усреднением направления спуска уступают в скорости сходимости одношаговым алгоритмам [9].

Основным отличием операции усреднения в алгоритмах адаптивной обработки сигналов и помех от обычного усреднения, проводимым в законах больших чисел, является то, что распределение вероятностей усредняемой случайной величины зависит от многомерного параметра, который изменяется в процессе адаптации. Следовательно, усреднение осуществляется одновременно с оцениванием искомого оптимального многомерного параметра. Алгоритмы адаптивной обработки сигналов и помех, в которых операция усреднения ведется одновременно с оцениванием искомого оптимального вектора весовых коэффициентов, можно назвать модифицированными алгоритмами адаптивной обработки сигналов и помех одновременного действия.

Цель статьи: исследование модифицированного алгоритма адаптивной обработки сигналов и помех одновременного действия в линиях информационного обмена.

В линиях ИО наиболее целесообразно применение адаптивных антенн, в которых реализован алгоритм адаптации МСКО. Эквивалентное дифференциальное уравнение, описывающее работу такой антенны,

имеет вид

$$\frac{dW(t)}{dt} = 2K_s \varepsilon(t) X^*(t), \quad (1)$$

где $W(t)$ – вектор адаптируемых весовых коэффициентов; K_s – коэффициент усиления в контуре адаптации; $\varepsilon(t) = S_0 - X^T(t)W(t)$ – сигнал рассогласования, а S_0 и $X(t)$ – эталонный (опорный) сигнал и вектор входных сигналов адаптивной системы.

Эффективность обработки сигналов в адаптивных антеннах, реализующих алгоритм (1), в авиационных линиях ИО, как показывают исследования, оказывается невысокой [7]. Одной из основных причин этого является то, что оценка градиента $\varepsilon(t) X^*(t)$ содержит наряду с регулярной составляющей (истинное значение градиента) случайную шумовую составляющую (ошибку градиента) [9]. Из-за наличия шумовой составляющей время адаптации (настройки требуемых значений весовых коэффициентов) увеличивается. Кроме этого, снижается точность настройки весовых коэффициентов.

В этом случае для повышения эффективности обработки (увеличения точности и скорости настройки весовых коэффициентов) воспользуемся вместо алгоритма (1) модифицированным алгоритмом адаптивной обработки сигналов и помех одновременного действия. Для этого модифицируем алгоритм (1) и введем операцию усреднения (сглаживания) текущей оценки градиента. Пусть операция усреднения определяется некоторым оператором Θ_t . С учетом данного оператора модифицированный алгоритм адаптивной обработки МСКО одновременного действия может быть записан как

$$\frac{dW(t)}{dt} = 2 K_s \Theta_t \varepsilon(t) X^*(t). \quad (2)$$

Пусть оператор Θ_t реализуется некоторым стационарным фильтром и описывается линейным дифференциальным уравнением первого порядка с постоянными коэффициентами и

$$T \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = k \varepsilon(t) X^*(t), \quad (3)$$

где T – постоянная времени фильтра; k – коэффициент передачи; $\varepsilon(t) X^*(t)$ – входной сигнал фильтра (текущее значение оценки градиента); $Y(t)$ – выходной сигнал фильтра – сглаженное значение оценки градиента.

Весовая функция такого фильтра имеет вид: $g(t, \tau) = k e^{-(t-\tau)/T}$, где τ – момент воздействия дельта импульса на входе фильтра, а t – теку-

шее время. В силу линейности результирующий отклик фильтра можно рассматривать для отдельных составляющих оценки градиента на его входе. Для шумовой составляющей оценки градиента, описываемой случайным процессом в виде белого шума с нулевым математическим ожиданием, дисперсия процесса на выходе определяется выражением

$$D_y(t) = \frac{k^2 N_0}{2T} \left(1 - e^{-2t/T}\right), \quad (4)$$

где $N_0/2$ – спектральная плотность мощности шумовой составляющей оценки градиента, действующего на входе фильтра.

Из (4) следует, что дисперсия шумовой составляющей оценки градиента на выходе фильтра возрастает по экспоненциальному закону и в установившемся режиме достигает значения, равного $D_y(t) = k^2 N_0 / (2T)$. В установившемся режиме величина дисперсии шумовой составляющей оценки градиента на выходе фильтра пропорциональна коэффициенту передачи k и обратно пропорциональна постоянной времени T фильтра.

Следовательно, для уменьшения уровня шумовой составляющей оценки градиента целесообразно использовать фильтр с большой постоянной времени или фильтр с малым коэффициентом передачи. Увеличение постоянной времени связано с уменьшением полосы пропускания фильтра, которое вызывает искажение формы регулярной составляющей оценки градиента на выходе фильтра. При этом уменьшение коэффициента передачи будет вызывать только пропорциональное изменение формы регулярной составляющей оценки градиента. Отфильтрованная таким фильтром оценка градиента в момент времени t будет содержать всю информацию о текущих оценках градиента в предшествующие моменты времени. Поэтому эффективность обработки сигналов и помех на последующих этапах адаптации с учетом такой оценки градиента будет несколько снижаться. По этой причине использование стационарных фильтров позволяет повысить эффективность адаптивной обработки сигналов только на начальных этапах адаптации.

Для устранения отмеченного недостатка предлагается осуществлять фильтрацию текущей оценки градиента нестационарным фильтром с переменным во времени коэффициентом передачи. Пусть закон изменения коэффициента передачи фильтра определяется выражением $1/(1+t)$. В этом случае дисперсия шумовой составляющей оценки градиента на выходе фильтра в установившемся режиме пропорциональна величине $1/(1+t)^2$, где t – текущее время. Это означает, что в таком фильтре с течением времени снижается восприимчивость отфильтрованной оценки

градиента к случайным отклонениям оценки, обусловленным шумами.

Пусть постоянная времени T рассматриваемого нестационарного фильтра равна единице. Тогда фильтр может быть описан линейным дифференциальным уравнением первого порядка с переменными коэффициентами

$$(t+1) \frac{dY(t)}{dt} + (t+1) Y(t) = X(t), \quad (5)$$

где $X(t)$ – функция, описывающая входную оценку градиента. Весовая функция такого фильтра согласно (5) будет определяться выражением

$g(t, \tau) = \frac{1}{\tau+1} e^{-\int_{\tau}^t d\theta} = \frac{1}{\tau+1} e^{-(t-\tau)}$. С учетом (5) и тех же характеристик шумовой составляющей градиента на входе фильтра уравнение для дисперсии $D_y(t)$ шумовой составляющей градиента на выходе фильтра примет вид

$$\frac{dD_y(t)}{dt} + 2D_y(t) = \frac{1}{(t+1)^2} \frac{N_0}{2}. \quad (6)$$

Общее решение данного уравнения будет определяться в виде

$$D_y(t) = e^{-2t} \frac{N_0}{2} \int_0^t \frac{e^{2t}}{(1+t)^2} dt + e^{-2t} C, \quad (7)$$

где $C = D_y(0)$. Пусть при $t = 0$ дисперсия на выходе фильтра $D_y(t) = 0.01$, $N_0 = 1$. В этом случае характер изменения дисперсии шумовой составляющей оценки градиента $D_y(t)$ во времени на выходе фильтра приведен на рис. 1.

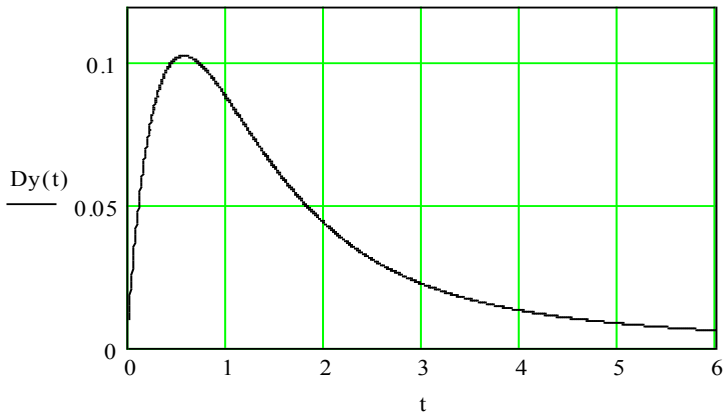


Рис. 1. Характер изменения $D_y(t)$ на выходе фильтра

Из рисунка видно, что в начальный момент времени ($t = 0$) дисперсия

равна $D_y(t) = 0.01$. Затем дисперсия увеличивается и при $t = 0.56$ достигает своего максимума, равного $0.103 N_0$. Далее дисперсия уменьшается и стремится к 0. Такой характер зависимости дисперсии во времени позволяет получать на выходе фильтра в определенные моменты времени сглаженную оценку шумовой составляющей градиента с различной дисперсией. Чем больше время t ($t > 1$), тем меньше дисперсия шумовой составляющей оценки градиента на выходе фильтра. Однако следует учесть, что уменьшение дисперсии шумовой составляющей оценки градиента сопровождается искажением ее регулярной составляющей. Поэтому если регулярная составляющая оценки градиента изменяется во времени, то для уменьшения искажений ее формы необходимо осуществлять периодическое изменение коэффициента передачи фильтра. Такое изменение коэффициента передачи фильтра, например, можно определить функцией следующего вида:

$$k(t) = \begin{cases} (1+t)^{-1} & \text{при } 0 \leq t \leq T_n; \\ (1+(t-T_n))^{-1} & \text{при } T_n \leq t \leq 2T_n; \\ \dots\dots\dots & \\ (1+(t-(M-1)T_n))^{-1} & \text{при } (M-1)T_n \leq t \leq MT_n, \end{cases} \quad (8)$$

где T_n – выбранный период изменения коэффициента передачи; M – общее число периодов. Тогда величину периода T_n можно выбирать из условия минимума отклонения регулярной составляющей оценки градиента на входе и выходе фильтра. Период T_n , удовлетворяющий этому условию, будем называть оптимальным.

Оператору Θ_t , осуществляющему периодическую фильтрацию в непрерывном времени с учетом (8), можно поставить в соответствие дискретный алгоритм текущей оценки градиента X_K на K -м шаге в виде

$$\varphi_{2_{K+1}} = \varphi_{2_K} + 0.5 \times (1+K)^{-1} \times (X_K - (1+K) \times \varphi_{2_K}), \quad (9)$$

где $K = 0 \dots N$.

Для определения оптимального периода рассматривалось преобразование регулярной составляющей текущей оценки градиента в периодически нестационарном фильтре для наиболее типичной математической модели изменения регулярной составляющей оценки градиента адаптивных алгоритмов в виде функции $X(t) = e^{-\alpha t}$, где α – некоторая константа ($\alpha \geq 0$), определяющая скорость убывания регулярной составляющей градиента. Из проведенного анализа следует, что существует некоторый диапазон значений периода, при которых имеет место минимальное искажение регулярной составляющей оценки градиента. Эти

значения периода соответствуют 5 – 10 шагам модифицированного алгоритма адаптации одновременного действия (2). На основании полученных результатов была произведена проверка работоспособности модифицированного алгоритма адаптации в двухэлементной антенной системе линии ИО, на которую воздействовал мощный источник преднамеренной помехи и осуществлялся прием немодулированного сигнала. Угол между направлениями прихода полезного сигнала и помехи составлял 30° . Исходная диаграмма направленности антенной системы выбиралась изотропной. На рис. 2 приведены реализации выходного сигнала адаптивной антенны (сплошная кривая), полезного сигнала (пунктирная кривая), а также действительной (штриховая кривая) и мнимой (штрихпунктирная кривая) составляющих отфильтрованной оценки градиента на выходе нестационарного фильтра (5).

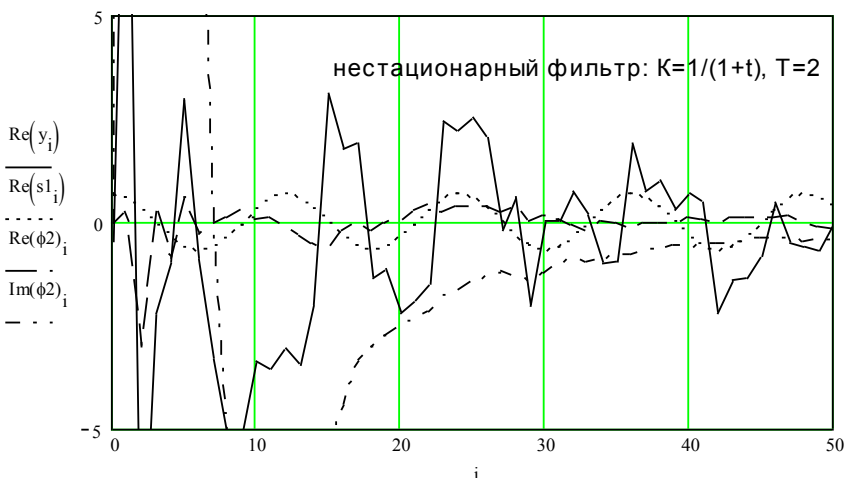


Рис. 2. Вид кривых реализации сигналов и составляющих отфильтрованной оценки градиента на выходе нестационарного фильтра

Из анализа приведенных реализаций следует, что применение в модифицированном алгоритме адаптации одновременного действия оператора Θ_t , описываемого (9), не обеспечивает повышения эффективности адаптации антенны. Процесс адаптации затягивается, а точность воспроизведения сигнала на выходе антенны остается невысокой. Имеющие место некоторые преимущества на начальных шагах адаптации на последующих шагах теряются. Иная ситуация имеет место при использовании оператора Θ_t , реализующего периодическую нестационарную фильтрацию текущей оценки

градиента в соответствии с дискретным алгоритмом вида

$$\varphi_{2_{K+1}} = \varphi_{2_K} + 0.5 \times k(K) \times (X_K - k^{-1}(K) \times \varphi_{2_K}), \quad (10)$$

где $k(K)$ – дискретный аналог функции $k(t)$, определяемой выражением (8).

На рис. 3, а, б приведены реализации аналогичных сигналов при использовании в адаптивной антенной системе периодически нестационарного оператора с различными периодами изменения коэффициента передачи, равными $T_n = 10$ и $T_n = 5$ соответственно.

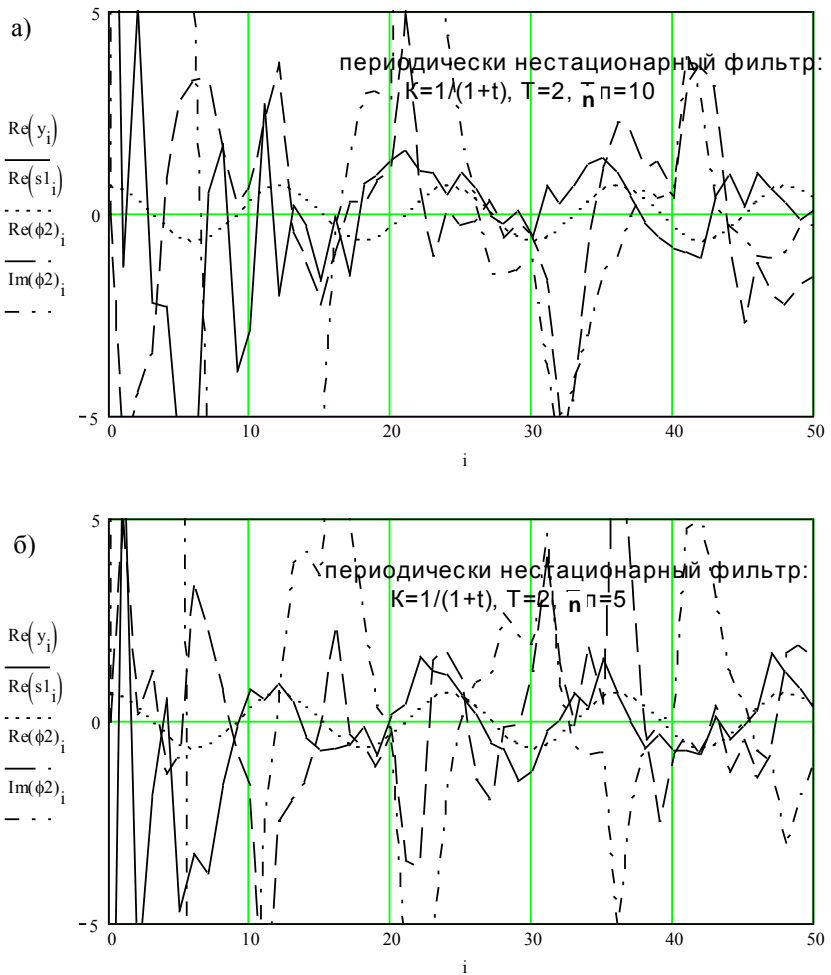


Рис. 3. Результаты моделирования: а – $T_n = 10$; б – $T_n = 5$

Результаты моделирования показывают, что использование процедуры

(10) в алгоритмах адаптации позволяет повысить эффективность адаптивной обработки сигналов и помех в адаптивных антенных системах. Так, например, средний квадрат погрешности воспроизведения эталонного сигнала в адаптивной системе без оператора сглаживания составляет 1.64. При использовании нестационарного оператора средний квадрат погрешности воспроизведения эталонного сигнала составляет 0.98, а в случае периодически нестационарного оператора – 0.43. Кроме этого применение в алгоритмах адаптации процедуры (10) повышает скорость адаптации на порядок. При периодическом изменении коэффициента передачи в операторе сглаживания появляется возможность отслеживания нестационарных изменений регулярной составляющей текущей оценки градиента.

Эта способность рассматриваемых модифицированных алгоритмов адаптивной обработки одновременного действия с периодическим оператором сглаживания позволяет применять их в условиях нестационарности конфигурации линий ИО.

Однако указанная способность модифицированных алгоритмов обеспечивается за счет некоторого увеличения флуктуаций выходного отношения сигнал/(помеха+шум). В качестве примера на рис. 4 приведена зависимость выходного отношения сигнал/(помеха+шум) (сплошная кривая) при $T_n = 5$. Здесь пунктирная кривая характеризует зависимость выходного отношения сигнал/(помеха+шум) в неадаптивной антенной системе.

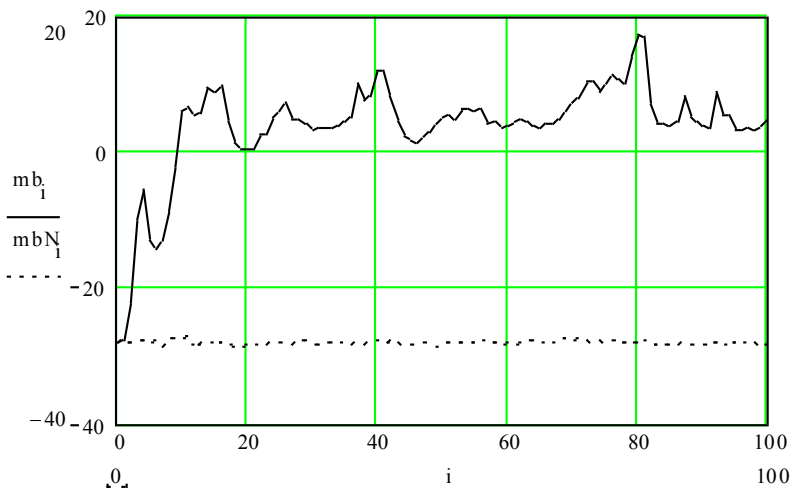


Рис. 4. Зависимость выходного отношения сигнал/(помеха+шум) при $T_n = 5$

Таким образом, применение модифицированного алгоритма адаптации одновременного действия с периодическим оператором сглаживания

для фильтрации текущей оценки градиента при адаптивной обработке сигналов в антенных системах позволяет повысить скорость адаптации и точность настройки весовых коэффициентов. Оптимальная величина периода изменения оператора сглаживания равна 5 – 10. Дальнейшие исследования целесообразно продолжить в направлении поиска эффективных операторов периодического сглаживания для различных алгоритмов адаптивной обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
2. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.
3. Адаптивная компенсация помех в каналах связи / Под ред. Ю.И. Лосева. – М.: Радио и связь, 1988. – 208 с.
4. Родимов А.П., Поповский В.В. Статистическая теория поляризации-временной обработки сигналов и помех в линиях связи. – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.
5. Венскаускас К.К. Компенсация помех в судовых радиотехнических системах. – Л.: Судостроение, 1989. – 264 с.
6. Адаптивные радиотехнические системы с антенными решетками / Журавлёв А.К., Хлебников В.А. и др. – Л.: Из-во ЛГУ, 1991. – 544 с.
7. Поспелов Б. Б. Исследование эффективности адаптивных антенных систем при нестационарности конфигурации «приемник – передатчик» // Радиоэлектроника. – 2000. – Т. 43. – № 3 – 4. – С. 73 – 76.
8. Гупал А.М. Стохастические методы решения негладких экстремальных задач. – К.: Наук. думка, 1979. – 152 с.
9. Поляк Б.Т. Сравнение скорости сходимости одношаговых и многошаговых алгоритмов оптимизации при наличии помех // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. – 1977. – № 1. – С. 9 – 12.

Поступила 22.08.2003

ПОСПЕЛОВ Борис Борисович, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры ХИ ВПС. Область научных интересов – адаптивная обработка сигналов в системах обмена информацией различного назначения.

ГРУШЕНКО Михаил Викторович, начальник учебного отдела ХИ ВПС. В 1988 году окончил Военную академию связи. Область научных интересов – помехозащищенность авиационных радиолиний.